



Citation: G. Perone (2019) Crescita economica e riduzione dei GHGS: un problema globale. *Italian Review of Agricultural Economics* 74(1): 19-31. doi: 10.13128/REA-25477

Copyright: © 2019 G. Perone. This is an open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (<http://www.fupress.com/rea>) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All relevant data are within the paper and its Supporting Information files.

Competing Interests: The Author(s) declare(s) no conflict of interest.

Crescita economica e riduzione dei GHGS: un problema globale

GAETANO PERONE

Dipartimento di Scienze aziendali, economiche e metodi quantitativi, Università degli Studi di Bergamo, Italy

Abstract. The environmental sustainability is probably one of the most controversial topics of national policy agendas. The needs to combine economic growth and well-being, have forced governments to introduce tools for reducing CO₂ emission and avoiding climate change. This paper aims to assess the effectiveness of these measures in the 1990-2014 period for a sample of 188 countries; and to analyze the determinants of CO₂ in the 2000-2014 period for a sample of 175 countries. The results suggest that *i*) richest countries have a GDP elasticity of CO₂ greater than that of poorest countries; and *ii*) GDP, energy consumption, urbanization, agricultural development, tourism and depletion of natural resources are directly correlated to CO₂, while forest area, alternative energy, trade openness and FDI inflows are inversely related to CO₂.

Keywords: CO₂, crescita ecosostenibile, consumi energetici, urbanizzazione, fonti energetiche alternative.

JEL codes: B22, N50, Q56, Q57.

1. INTRODUZIONE

Il tema della sostenibilità ambientale costituisce probabilmente uno degli argomenti più controversi e discussi all'interno delle agende di politica economica non solo dei paesi sviluppati ma anche di quelli di recente industrializzazione. Negli ultimi trenta anni la necessità di coniugare crescita economica ed equilibrio naturale, di preservare la biodiversità, e le sempre maggiori preoccupazioni sui mutamenti climatici prodotti dalle emissioni industriali di gas serra, hanno spinto la comunità internazionale a promuovere progetti e agende condivise sui temi dello sviluppo ecosostenibile.

Difatti, il surriscaldamento globale generato dall'intensificazione delle attività produttive e dal progressivo esaurimento del capitale naturale, ha mobilitato le coscienze e gli strati più profondi della società civile, sollevando l'esigenza di una revisione radicale delle direttrici lungo le quali si stanno sviluppando i rapporti uomo-ambiente e sviluppo economico.

Nel corso degli ultimi anni si sono, dunque, susseguiti numerosi incontri tesi alla promozione di accordi di carattere sia volontario che vincolante, e aventi come obiettivo primario l'individuazione e l'adozione delle strategie più efficaci nella riduzione delle emissioni di gas serra. Fra i più noti, ritro-

viamo le Conferenze sull'Ambiente e lo Sviluppo delle Nazioni Unite tenutesi a Rio de Janeiro nel 1992 e nel 2012 (Rio +20) e gli Accordi di Parigi (2015).

Allo stato attuale, le numerose iniziative di sensibilizzazione e responsabilizzazione portate avanti dalla maggioranza dei paesi industrializzati non hanno dato i risultati sperati. Basti pensare che secondo il recente rapporto internazionale dell'Agenzia Nazionale Oceanica e Atmosferica (NOAA), *State of the Climate*, nel 2017 la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera ha raggiunto il record storico di 405 parti per milione (Blenden *et al.*, 2018), circa il 14,4% in più del 1990 (elaborazioni su dati NOAA)¹. Allo stesso tempo, dal 1990 al 2017 le temperature globali delle terre emerse e dei mari sono aumentate mediamente di circa 0,38°C (elaborazioni su dati Met Office Hadley Centre)².

L'obiettivo del lavoro in oggetto sarà duplice: *i*) da un lato proveremo a verificare se la cogenza degli accordi internazionali abbia avuto un effetto significativo sull'andamento delle emissioni dei paesi avanzati; e *ii*) dall'altro cercheremo di individuare le principali determinanti delle emissioni di CO₂ per un campione di 175 paesi, al fine di identificare gli strumenti di politica ambientale più efficaci nella lotta all'inquinamento.

2. I PRINCIPALI ACCORDI INTERNAZIONALI SUL CLIMA

Prima di addentrarci nelle questioni tecno-economiche, è utile descrivere sinteticamente i principali accordi internazionali sul clima stipulati negli ultimi decenni. La cronistoria delle convenzioni sull'ambiente ha inizio con la Conferenza sull'Ambiente e lo Sviluppo delle Nazioni Unite tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992³, alla quale hanno preso parte 172 paesi e 108 capi di stato. L'incontro, ribattezzato Summit della Terra, ha condotto alla firma comune di numerosi e importanti documenti di impegno formale, fra cui la Convenzione sui cambiamenti climatici, l'Agenda 21, la Convenzione sulla biodiversità, l'Accordo sugli stock ittici e la Dichiarazione sulle foreste. La Convenzione quadro sui cambiamenti climatici delle Nazioni Unite (UNFCCC), divenuta vincolante nel

1997 con l'adozione del Protocollo di Kyoto (e attuativa nel 2005), costituisce la pietra d'angolo dell'intero progetto, in quanto con essa viene stabilita la necessità e l'urgenza di ridurre progressivamente le emissioni di gas serra, con particolare riguardo per i paesi industrializzati e le economie in transizione⁴.

Nello specifico, il Protocollo di Kyoto, con i suoi 26 articoli, ha obbligato per la prima volta le parti contraenti al rispetto di limiti giuridicamente vincolanti di emissioni di gas serra⁵, prevedendo anche il miglioramento dell'efficienza energetica, la correzione delle imperfezioni dei mercati e lo sviluppo concordato di forme di energia sostenibili e di agricoltura biologica (United Nations, 1998).

Queste preliminari disposizioni sono state successivamente riconfermate e integrate nel corso di diversi summit internazionali e richiamate dall'ONU tra i *Sustainable Development Goals*. In particolare, il Clima e le relative politiche hanno caratterizzato due summit incentrati sugli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra e in particolare di monossido di carbonio: *i*) l'incontro del 2008 fra l'Unione Europea e 37 paesi industrializzati sulla prima fase di impegno degli accordi⁶ (Idem); e *ii*) l'adozione dell'Emendamento di Doha⁷ nel 2012 sulla seconda fase di impegno degli accordi (United Nations, 2012).

Al fine di assicurare il rispetto di tali accordi in seno all'UE-28, la Commissione Europea – su approvazione del Parlamento europeo – ha varato la dir. 2009/28/CE, il c.d. Pacchetto per il clima e l'energia 2020. Un disposto normativo avente tre obiettivi fondamentali entro il 2020: *i*) la riduzione delle emissioni di gas serra di almeno il 20% rispetto al 1990; *ii*) la riduzione del 20% dell'e-

⁴ I paesi effettivamente vincolati sono solo 39 su 180, come riportato nell'elenco *Annex I* dell'accordo.

⁵ L'accordo ha previsto limiti restrittivi per i gas serra con il maggior potere climalterante: anidride carbonica, esafluoro di zolfo, idrofluorocarburi, metano, ossido di azoto e perfluorocarburi. L'esafluoro, gli idrofluorocarburi e i perfluorocarburi vengono anche chiamati F-gas o gas fluorurati. Per garantire il raggiungimento degli obiettivi dichiarati, l'accordo ha previsto l'utilizzo di tre strumenti: *i*) l'*emission trading*, ovvero la possibilità per i paesi più virtuosi di vendere "permessi" di inquinamento ai paesi meno accorti; *ii*) la *joint implementation*, che si riferisce all'opportunità di accordi fra le parti contraenti sulla redistribuzione degli obiettivi, a patto che l'obbligo complessivo venga rispettato; e *iii*) i *clean development mechanisms*, con i quali i paesi giuridicamente vincolati, aiutando i paesi relativamente più poveri a contrarre l'inquinamento da CO₂, possono ottenere speciali certificati di riduzione delle emissioni (CERs) da sottrarre ai valori effettivamente registrati sul territorio nazionale (United Nations, 1998).

⁶ Col quale i firmatari del Protocollo di Kyoto si sono impegnati a ridurre le emissioni di CO₂ del 5% rispetto al 1990 entro il 2012.

⁷ Col quale i firmatari del Protocollo di Kyoto si sono impegnati a ridurre le emissioni di CO₂ del 18% rispetto al 1990 entro il 2020. Nel corso di questo incontro, le parti hanno inoltre aggiunto alla lista dei gas serra il trifluoruro di azoto.

¹ Le serie storiche sono reperibili alla URL: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.

² Le serie storiche sono reperibili alla URL: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/index.html>. Per maggiori dettagli sulla metodologia, invece, si rimanda a Morice *et al.* (2012).

³ È necessario precisare che l'incontro è stato preceduto da diverse tappe preparatorie, il cui asse portante è rappresentato dalla prima Conferenza delle Nazioni Unite sulla protezione dell'ambiente di Stoccolma, che nel 1972 ha riunito 113 paesi e condotto all'adozione della prima Dichiarazione dei diritti e delle responsabilità ambientali dell'uomo.

nergia consumata proveniente da fonti fossili, attraverso il miglioramento dell'efficienza energetica; e *iii*) l'approvvigionamento del 20% del fabbisogno energetico totale con fonti rinnovabili.

L'ultimo significativo incontro in ordine temporale è infine costituito dagli Accordi di Parigi sui Cambiamenti climatici del 2015, con cui 195 paesi si sono giuridicamente impegnati a rispettare un rigido piano d'azione composto da 29 articoli. Lo scopo è quello contenere il surriscaldamento globale al di sotto dei 2 gradi centigradi, attraverso la riduzione delle emissioni di CO₂ di almeno il 40% dal 1990 entro il 2030 (United Nations, 2015).

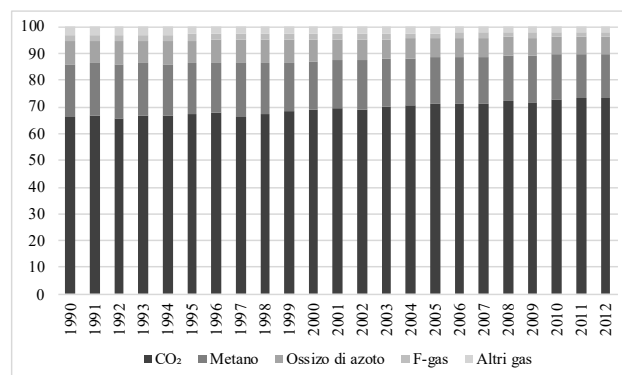
3. UNA RASSEGNA DELLA LETTERATURA SULLE DETERMINANTI DELLA CO₂

La CO₂ può essere considerata a pieno titolo come il gas serra quantitativamente più presente nell'atmosfera, nonché il più pericoloso, nel breve periodo, per il delicato equilibrio climatico del pianeta⁸. Difatti, nel periodo 1990-2012 la CO₂ ha contribuito in media per il 69,21% alle emissioni totali di gas serra, seguita nell'ordine dal metano (18,28%), dall'ossido di azoto (7,82%) e dai gas fluorurati con il 4,69%. E come mostra la Figura 1 il suo apporto è progressivamente aumentato lungo tutta la finestra temporale considerata, passando dal 66,19% del 1990 al 73,24% del 2012, con uno scostamento netto del +7,05%.

Così, negli ultimi tre decenni – complice la maggiore attenzione della comunità internazionale per le tematiche ambientali – si è sviluppata una copiosa letteratura sull'argomento, che ha provato a indagare le determinanti delle divergenze fra i paesi industrializzati e in via di sviluppo nelle emissioni di CO₂ (Shafik, 1994; Schmalensee *et al.*, 1998; Ravallion *et al.*, 2000; Friedl, Getzner, 2003; Ang, 2007 e 2009; Weber *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2010; Iwata *et al.*, 2012; Solarin, 2014; Dogan, Seker, 2016a; Balogh, Jámor, 2017).

Schmalensee *et al.* (1998), avvalendosi di un campione variabile di paesi per il periodo 1950-1990, trovano una relazione a campana fra l'andamento del reddito pro-capite a parità di potere d'acquisto (ppa) e il consumo di energia pro-capite, e le emissioni pro-capite di CO₂, avallando l'esistenza della c.d. curva di Kuznets ambientale (d'ora in avanti EKG).

Fig. 1. Andamento comparato delle emissioni di gas serra a livello mondiale nel periodo 1990-2012.



Fonte: elaborazioni dell'autore su dati World Bank.

La EKG stabilisce una relazione parabolica fra la crescita del reddito pro-capite e l'inquinamento ambientale di un paese. In altri termini, inizialmente l'aumento del reddito nei paesi relativamente più arretrati è associato a un incremento consistente delle emissioni inquinanti, che tuttavia, raggiunto un certo picco di benessere economico cominciano gradualmente a ridursi⁹ (Kuznets, 1955; Grossman, Krueger, 1991; Dogan, Seker, 2016b).

Un'evidenza confermata, almeno nel segno della sua relazione, da Ang (2009), che analizzando i dati sui consumi energetici e sulle emissioni inquinanti in Cina nel periodo 1953-2006, stima che le principali determinanti della CO₂ sono il consumo pro-capite di energia, il pil pro-capite e il grado di apertura commerciale.

Lo studio di Sharma (2011), invece, concentra la sua attenzione su un numero maggiore di variabili indipendenti, studiate attraverso un modello panel dinamico per un campione di 69 economie mondiali nel periodo 1985-2005. Nello specifico, egli rileva che il pil pro-capite e il consumo di energia primaria pro-capite sono positivamente e significativamente correlati alla dinamica delle emissioni di CO₂; mentre, il tasso di urbanizzazione, il grado di apertura commerciale e il consumo pro-capite di energia sembrano essere associati a una riduzione delle emissioni di CO₂.

Balogh e Jámor (2017) considerano il ruolo giocato da variabili meno convenzionali ma altresì fundamenta-

⁸ In termini relativi il gas più pericoloso è il metano, che – nonostante consenta di ridurre le emissioni di CO₂ e particolato – detiene un potere climaterante da 21 a 28 volte maggiore lungo un orizzonte di 100 anni, e 84 volte superiore su un periodo di 20 anni (Mohajan, 2011; IPCC, 2014).

⁹ È necessario, tuttavia, sottolineare che non tutti gli studi convergono su questa ipotesi. Secondo un'analisi realizzata da Andersson e Karpestam (2013) la relazione di associazione fra crescita economica ed emissioni di gas serra non troverebbe adeguato fondamento scientifico. Mentre Tiwari (2011), Lim *et al.* (2014) e Gosh *et al.* (2014) dimostrano l'esistenza di una relazione addirittura negativa fra crescita del pil ed emissioni di CO₂, rispettivamente per l'India, le Filippine e il Bangladesh.

li nello spiegare l'andamento dei livelli di inquinamento. Essi testano le loro ipotesi attraverso una serie di modelli panel GMM (generalized method of moments) su un campione di 168 paesi per il periodo 1990-2013, trovando che l'uso di fonti energetiche rinnovabili, l'energia nucleare, lo sviluppo del settore agricolo e del settore finanziario riducono le emissioni di CO₂, mentre l'aumento dei turisti internazionali pro-capite, il grado di apertura commerciale, la produttività del settore agricolo e l'utilizzo di energia prodotta dal carbone favoriscono un'accelerazione delle emissioni di CO₂.

Fra queste variabili è utile menzionare il grado di apertura commerciale, lo sviluppo del settore agricolo e il turismo internazionale. Per quanto concerne l'agricoltura, secondo Grace *et al.* (2014) essa contribuisce fra il 7-14% alle emissioni globali di CO₂, ovvero fra i 2,5 e i 5 miliardi di tonnellate di CO₂ equivalente solo nel 2014. In particolare, l'aumento delle terre coltivate accrescerebbe i processi di deforestazione, provocando una diminuzione della naturale proprietà dei boschi di sottrarre CO₂ all'atmosfera (Baccini *et al.*, 2012). Con riferimento al commercio internazionale, invece, alcuni studi dimostrano che la maggiore facilità di accesso alle nuove conoscenze tecnologiche in materia di tutela ambientale, indotta dal potenziamento degli scambi commerciali, può consentire di ridurre significativamente le emissioni complessive di CO₂ (Akin, 2014).

Infine, in merito al turismo, Lee e Brahmasrene (2013), avvalendosi di modelli panel con effetti fissi e di tecniche di cointegrazione per i paesi dell'Unione Europea nel periodo 1988-2009, dimostrano che esisterebbe una relazione negativa di lungo periodo fra il numero dei turisti internazionali e le emissioni di CO₂¹⁰. A cui si aggiunge anche il rapporto di correlazione inversa fra gli investimenti diretti esteri (IDE) in entrata e i livelli di inquinamento.

4. ANALISI GEOGRAFICA E REDDITUALE DELLE EMISSIONI DI CO₂

Come puntualizzato nella parte introduttiva dell'elaborato, l'obiettivo primario (ma non esclusivo) degli accordi internazionali stipulati dai paesi industrializzati è stato quello di ridurre progressivamente le emissioni di gas serra e contestualmente di promuovere uno sviluppo economico ecosostenibile e biocompatibile. Tuttavia, nonostante l'adesione volontaria di una parte considere-

vole della comunità internazionale, l'attuazione dei relativi disposti normativi ha incontrato non pochi problemi, che possiamo sintetizzare nei seguenti due punti: *i)* le delocalizzazioni e/o esternalizzazioni produttive e *ii)* il *free riding*.

In primo luogo, i paesi industrializzati possono aggirare i limiti imposti dai trattati internazionali delocalizzando e/o esternalizzando nei paesi relativamente più poveri fasi particolarmente inquinanti dei propri processi produttivi, sfruttandone la legislazione ambientale più permissiva e gli standard lavorativi molto bassi (Yunus, 2008; Rodrik, 2011). Una circostanza che da un lato determina un incremento dell'impronta ecologica¹¹ dei paesi arretrati e in via di sviluppo e dall'altro distorce significativamente il sistema di imputazione delle responsabilità delle emissioni (Piccari, 2018)¹².

In seconda istanza, i paesi contraenti possono decidere unilateralmente di non adempiere alle obbligazioni stipulate e di scaricare sugli altri governi l'intero onere della riparazione del danno ambientale, godendo esclusivamente dei benefici dello sfruttamento del bene pubblico, assumendo *de facto* un atteggiamento da *free rider* (Gosseries, 2004; Meyer, Roser, 2011; Huggel *et al.*, 2016). Un classico problema di *tragedy of the commons* generato dalle specificità dei beni pubblici, caratterizzati dalla non escludibilità nel consumo e dalla non rivalità nel godimento. In un tale contesto, l'incentivo a sfruttare i comportamenti virtuosi dei paesi più responsabili e attenti alla salvaguardia dell'ecosistema, attraverso l'assunzione di atteggiamenti opportunistici, è quindi particolarmente elevato (Castellucci, 2017; Tirole, 2017). Difatti, secondo Hardin (1968, p. 1244, ns. traduzione) «la rovina è la destinazione verso cui tutti gli uomini si precipitano, ognuno perseguendo il proprio miglior interesse in una società che crede nella libertà dei beni comuni. La libertà nei beni comuni porta tutti alla rovina».

Proviamo a verificare tali eventualità, cominciando con l'analisi dell'andamento medio delle emissioni pro-capite di CO₂ in tonnellate nel periodo 1990-2014¹³,

¹¹ Si tratta di un indice che prova a stimare la superficie di terra e di mare necessaria a un paese per rigenerare le risorse consumate e assorbire i rifiuti prodotti. E l'impronta di carbonio incide circa per il 50% dell'indicatore complessivo. Esso, dunque, consente di fornire una misura di sintesi dell'impatto delle attività umane sull'ecosistema (Wackernagel e Rees, 1998).

¹² Non bisogna, tuttavia, dimenticare che talvolta sono gli stessi paesi in via di sviluppo ad adottare strumenti di politica ambientale particolarmente blandi al fine di attirare gli IDE dei paesi più ricchi. Ciò accade soprattutto nei settori ad alta intensità di inquinamento, dove la regolamentazione ambientale può assumere carattere pienamente endogeno (Dean *et al.*, 2009).

¹³ Limitatamente ai dati resi disponibile dalla World Bank Open Data.

¹⁰ Diversamente, Shakouri *et al.* (2017), utilizzando un modello panel GMM per 12 paesi dell'area asiatica e pacifica nel periodo 1995-2013, trovano una relazione positiva e significativa fra gli arrivi di turisti internazionali e le emissioni di CO₂.

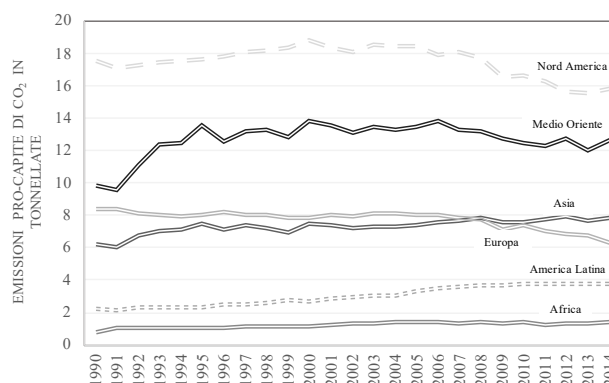
per cinque grandi aree geografiche del mondo¹⁴: Africa, America Latina, Asia, Europa, Medio Oriente e Nord America.

Dalla Figura 2 notiamo come nel periodo indagato nessuna delle regioni selezionate abbia fatto registrare una contrazione significativa delle emissioni di CO₂ che possa essere ricondotta in qualche modo all'adozione delle prescrizioni e al rispetto dei vincoli imposti dai trattati internazionali. Nel dettaglio, rileviamo che nei paesi africani, latino americani e asiatici, coerentemente con l'ipotesi della EKG, le emissioni pro-capite sono aumentate rapidamente, con variazioni medie del 73,7%, 72,07% e del 26,81%, rispettivamente; nel Medio Oriente, sono rimaste sostanzialmente stabili, manifestando un andamento medio sinusoidale, se si eccettua l'accelerazione fra il 1991 e il 1993; mentre, l'unica riduzione si è verificata nel Nord America e in Europa, con uno scostamento medio del -9,63% e del -24,32%, rispettivamente. Un *output* dovuto principalmente al crollo del reddito e della produzione industriale ivi registrate a seguito della recessione economica del biennio 2007/2008. Non è un caso che nel periodo immediatamente antecedente la crisi, le emissioni abbiano registrato invece un andamento sempre costante, che consente di escludere l'eventualità che la dinamica inquinante dei paesi interessati possa essere spiegata con la geometria della EKG.

Se analizziamo i valori medi assoluti, rileviamo che nel periodo indagato i livelli maggiori di inquinamento da CO₂ hanno riguardato i paesi del Nord America e del Medio Oriente, con emissioni pari a 17,49 e 12,67 tonnellate pro-capite annuali, rispettivamente; mentre quelli minori hanno interessato l'area africana e dell'America Latina, con emissioni pro-capite equivalenti a 1,23 e 3,01 tonnellate annuali, rispettivamente. Interessante è anche la dinamica dei paesi Europei, i quali vengono sopravanzati da quelli asiatici nel 2008. Entrambi si collocano in una posizione intermedia fra i due blocchi suindicati, con valori medi pari a 7,76 tonnellate per l'Europa e a 7,31 tonnellate per l'Asia.

Ma non solo, se calcoliamo l'elasticità delle emissioni di CO₂ al pil pro-capite nel periodo 1990-2014¹⁵ per un campione di 188 paesi, rileviamo che, *ceteris paribus*, i paesi con reddito medio superiore ai 10.000 dollari (ppa) registrano valori superiori a quelli con reddito medio inferiore ai 10.000 dollari (ppa). Nello specifico, nei primi un aumento dell'1% del reddito pro-capite è

Fig. 2. Andamento comparato delle emissioni pro-capite di CO₂ nel mondo nel periodo 1990-2014.



Fonte: elaborazioni dell'autore su dati World Bank.

associato a un incremento dell'1,02% delle emissioni pro-capite di CO₂; mentre, nei secondi a un incremento dell'1% del reddito pro-capite corrisponde un aumento dello 0,82% delle emissioni di CO₂. I coefficienti di correlazione mostrano una discreta concordanza fra le due variabili, che varia fra lo 0,48 dei paesi con reddito superiore e lo 0,56 dei paesi con reddito inferiore. Quindi, i paesi relativamente più ricchi fanno segnare in media un'elasticità più elevata dello 0,2% rispetto a quelli relativamente più poveri. Ovvero, nel periodo 1990-2014 hanno contribuito in misura proporzionalmente maggiore all'emissione di gas climalteranti in rapporto alla dinamica relativa del reddito.

Da una prima e sommaria analisi possiamo, dunque, affermare che i paesi industrializzati da un lato hanno ottemperato in modo solo parziale e incidentale alle prescrizioni contenute negli accordi internazionali in materia di riduzione delle emissioni, accrescendo anche il loro apporto relativo al processo di degradazione ambientale, e dall'altro sembrano aver viepiù gravato i paesi arretrati e in via di sviluppo delle esternalità negative connesse all'inquinamento¹⁶.

5. METODOLOGIA E RISULTATI DELLE STIME EMPIRICHE

Nella parte centrale dell'elaborato stimiamo, attraverso un modello OLS (ordinary least square) multi-

¹⁴ Al fine di evitare distorsioni nelle serie storiche, dal computo sono stati esclusi i valori dei microstati.

¹⁵ Per le emissioni di CO₂ abbiamo considerato lo scostamento percentuale fra le medie del triennio 1990-1992 e 2012-2014. Per quanto concerne il reddito pro-capite, abbiamo invece considerato la variazione percentuale fra il 2014 e il 1990.

¹⁶ Non ci si riferisce al surriscaldamento globale che colpisce indiscriminatamente tutti i paesi, ma agli effetti negativi che le attività industriali possono generare nel breve-medio periodo sul benessere sociale, come l'inquinamento idrico, acustico e atmosferico.

Tab. 1. Calcolo dell'elasticità delle emissioni di CO₂ pro-capite al reddito pro-capite in dollari internazionali (ppa), nel periodo 1990-2014.

Classificazione dei Paesi	Paesi considerati	Elasticità emissioni di CO ₂ al reddito	Coefficiente di correlazione
Reddito pro-capite > 10.000 \$	67	1,0194	+0,48
Reddito pro-capite < 10.000 \$	121	0,8227	+0,56
Tutti i Paesi	188	0,9372	+0,57

Fonte: elaborazioni dell'autore su dati World Bank.

variato, i principali *driver* delle emissioni di CO₂¹⁷ nel periodo 2000-2014, per un campione di 175 paesi¹⁸. Il periodo individuato sconta la mancanza di osservazioni complete per tutte le variabili oggetto dello studio e riflette la necessità di analizzare i cambiamenti strutturali e ambientali intervenuti nell'ultimo quindicennio.

Come nel paragrafo precedente, al fine di mitigare gli effetti distorsivi prodotti dalle procedure di rilevazione delle emissioni di CO₂, abbiamo scelto di considerare lo scostamento fra le medie del triennio 2000-2002 e 2012-2014¹⁹.

Nello specifico, la variazione delle emissioni di CO₂ in tonnellate pro-capite nel periodo 2000-2014, che costituiscono la variabile dipendente del modello, saranno funzione delle seguenti dieci variabili esplicative²⁰:

- la variazione del pil pro-capite in dollari internazionali (ppa) nel periodo 2000-2014 (World Bank database);
- la variazione del consumo pro-capite di energia primaria²¹ espresso in kg di petrolio equivalente nel periodo 2000-2014 (IEA database);

- la variazione del tasso di urbanizzazione, i.e. della percentuale della popolazione urbana sul totale, nel periodo 2000-2012 (United Nations, 2018);
- la variazione della superficie forestale sul totale in kmq nel periodo 2000-2014 (FAOSTAT-Forestry database);
- la variazione percentuale della superficie destinata a uso agricolo²² sul totale nel periodo 2000-2014 (FAOSTAT database);
- la variazione dell'approvvigionamento energetico, espresso come percentuale del consumo totale di energia, assicurato dall'energia nucleare e in generale dalle energie alternative²³ nel periodo 2000-2014 (IEA database);
- la variazione del grado di apertura commerciale di un paese²⁴ nel periodo 2000-2014 (World Bank database);
- la variazione del numero pro-capite di turisti internazionali in arrivo²⁵ nel periodo 2000-2014 (UNWTO database; World Bank database);
- la variazione del tasso di esaurimento delle risorse naturali²⁶ in percentuale del pil nel periodo 2000-2014 (World Bank database);
- e la media degli IDE in entrata in percentuale del pil nazionale nel periodo 2000-2014 (IMF database; World Bank database).

Al fine di evitare distorsioni nel modello e rendere comparabili le stime, tutte le variabili indipendenti sono state implementate come numeri indici a base fissa (2000=100). L'unica eccezione ha interessato gli IDE in entrata che, data l'elevata volatilità registrata nel periodo considerato, abbiamo preferito introdurre come media

¹⁷ I dati sulla CO₂ sono calcolati dal centro di analisi delle informazioni sull'anidride carbonica del Dipartimento di Energia degli Stati Uniti (CDIAC) sulla base dei dati sui consumi di combustibili fossili (contenuti nel dataset sull'energia mondiale della Divisione di Statistica delle Nazioni Unite) e sulla produzione mondiale di cemento (contenuti nelle Indagini Geologiche del Dipartimento dell'Interno degli Stati Uniti).

¹⁸ La differenza rispetto al campione precedente è determinata dalla mancanza di osservazioni sufficienti per alcune delle variabili implementate e dall'eliminazione dei paesi africani in guerra.

¹⁹ Secondo il CDIAC, i calcoli sul livello di inquinamento da CO₂ hanno probabilmente un limite di errore non superiore al 10%. Tuttavia, il grado di accuratezza delle stime nazionali può essere significativamente inferiore. Quindi, le possibilità di errori sistematici legati a osservazioni individuali non possono essere sottovalutate.

²⁰ I dati originali delle elaborazioni sono stati estrapolati dalla World Bank Open Data, disponibile alla URL: <https://data.worldbank.org/>. Quando non diversamente specificato, essi si intendono raccolti ed elaborati direttamente dalla World Bank. Alcune statistiche descrittive sono riportate in appendice (Tab. A.1.).

²¹ Si intende l'uso di energia primaria prima della trasformazione in altri combustibili a uso finale (come elettricità e prodotti petroliferi raffinati). Esso include l'energia da combustibili rinnovabili e rifiuti, biomasse soli-

de e prodotti animali, gas e liquidi provenienti dalle biomasse e rifiuti municipali e industriali.

²² Si fa riferimento alla superficie di terra arabile, a pascolo permanente e coltivata in modo permanente.

²³ Si intendono le fonti energetiche che non producono CO₂, come l'energia solare, eolica, idroelettrica, geotermica, l'energia ricavata dalle biomasse e il biodiesel.

²⁴ Si intende la somma delle esportazioni e delle importazioni di beni e servizi in percentuale del pil.

²⁵ Si intendono gli arrivi di turisti che hanno una residenza diversa dal paese di destinazione, e standardizzati sulla popolazione di quest'ultimo. I dati si riferiscono al numero degli arrivi e non a quello dei turisti, cosicché se una stessa persona viaggia più volte in un dato luogo, sarà registrata più volte.

²⁶ Si fa riferimento alla somma dell'esaurimento netto delle foreste, dell'energia e dei minerali. L'esaurimento netto delle foreste è calcolato come l'eccesso di raccolto di legname rispetto alla crescita naturale; l'esaurimento netto dell'energia è calcolato come il rapporto fra il valore dello stock di risorse energetiche (di carbone, petrolio e gas naturale) e la durata residua delle risorse (fissata a 25 anni); infine, l'esaurimento netto dei minerali è calcolato come il rapporto fra il valore dello stock di risorse minerarie (come oro, argento, rame etc.) e la durata residua della riserva (fissata a 25 anni).

dell'intera serie storica²⁷.

A causa dei problemi di eteroschedasticità degli errori rilevati con il test di Whyte (1980), per il calcolo degli stimatori OLS ci siamo avvalsi degli errori standard robusti rispetto alla violazione dell'ipotesi di omoschedasticità, ottenuti secondo la procedura di Huber (1967) e Whyte (1980). Mentre, la violazione dell'ipotesi di distribuzione normale degli errori, rilevata col test di Shapiro-Wilk (1965), è stata corretta mediante la trasformazione logaritmica della variabile dipendente.

La statistica *F* di Fischer-Snedecor restituisce un valore pari a 17,92, nettamente superiore rispetto a quello tabulato (2,05); quindi, il modello OLS stimato risulta statisticamente verificato a un livello di significatività dell'1%.

Come mostrato dalla Tabella 2, tutte le variabili indipendenti implementate nel modello risultano statisticamente verificate, anche se con intensità e livelli di significatività diversi. A riguardo, l'indice di determinazione ci informa che i regressori consentono di spiegare congiuntamente circa il 60% della variabilità delle emissioni di CO₂ nel periodo 2000-2014.

Nello specifico, il pil pro-capite, il consumo di energia primaria pro-capite, il tasso di urbanizzazione, la superficie agricola, l'esaurimento delle risorse naturali e il numero di turisti internazionali pro-capite sono positivamente correlati alla variazione delle emissioni di CO₂; mentre, la superficie forestale, la produzione di energia nucleare e di energie alternative, il grado di apertura commerciale e gli IDE in entrata sono inversamente correlati alla dinamica delle emissioni di CO₂. I regressori che sembrano contribuire maggiormente all'aumento delle emissioni inquinanti sono in ordine decrescente²⁸: la superficie agricola, il consumo di energia pro-capite, il tasso di urbanizzazione e il pil pro-capite. Fra questi, i consumi di energia primaria pro-capite assumono un ruolo centrale; difatti, come mostrato dalla matrice di correlazione in appendice (Tab. A.2.), il coefficiente di correlazione con le emissioni inquinanti è molto alto e prossimo allo 0,9²⁹. Mentre, le variabili che consentono di ridurre in modo più significativo le emissioni di CO₂ sono la superficie forestale e l'energia nucleare e alternativa.

In entrambi i casi, tali valori non solo sono caratterizzati dai coefficienti mediamente più elevati, ma nella

Tab. 2. Risultati delle stime OLS sulle emissioni di CO₂ in 175 paesi, nel periodo 2000-2014.

Variabili	Modello OLS (Errore Standard)
Costante	3,9211*** (0,2271)
Δ Pil pro-capite	0,0022*** (0,0005)
Δ Consumo di energia primaria	0,0026*** (0,0005)
Δ Urbanizzazione	0,0023* (0,0014)
Δ Superficie forestale	-0,0042*** (0,0012)
Δ Superficie agricola	0,0042*** (0,0012)
Δ Energia nucleare e alternativa	-0,0010*** (0,0003)
Δ Apertura commerciale	-0,0001** (0,0000)
Δ Esaurimento risorse naturali	0,0000*** (0,0000)
Δ Turisti internazionali pro-capite	0,0000* (0,0000)
Media IDE in entrata	-0,0013* (0,0008)
R ² corretto	0,5971
Shapiro-Wilk (p-value)	0,5218
Whyte (p-value)	0,0031
Numero di osservazioni	175

Fonte: elaborazioni dell'autore su dati World Bank. Note: ***p-value < 0,01; **p-value < 0,05; *p-value < 0,10. Errori standard fra parentesi, basati sul procedimento di Huber (1967) e Whyte (1980).

maggior parte dei casi risultano anche verificati a un livello di significatività dell'1%.

L'unica eccezione è rappresentata dal tasso di urbanizzazione, che assieme agli IDE in entrata e al numero di turisti internazionali pro-capite risulta significativo solo un livello del 10%. Tuttavia, l'elevato numero di paesi considerati e la congruenza dei regressori con la letteratura di riferimento, ci inducono a ritenere complessivamente affidabile l'*output* ottenuto.

6. DISCUSSIONE DEI RISULTATI E POSSIBILI TRAIETTORIE DI SVILUPPO FUTURE

In primo luogo, i segni delle variabili indipendenti utilizzate nel modello sembrano decisamente coerenti con la letteratura recente sulle determinanti delle emissioni di CO₂ (Sharma, 2011; Akin, 2014; Grace *et al.*,

²⁷ Il relativo coefficiente di regressione non deve essere dunque interpretato come scostamento dalla *baseline* (1990) ma come variazione sul pil totale.

²⁸ Assumiamo per semplicità che il rapporto di causazione sia unidirezionale.

²⁹ Si tratta di un risultato atteso, in quanto i consumi di energia pro-capite possono essere utilmente utilizzati, almeno statisticamente, come proxy delle principali variabili di sviluppo socioeconomico (Cserekyei *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016).

2014; Pazienza, 2015; Balogh, Jámbo, 2017; Shakouri *et al.*, 2017). In particolare, i risultati sembrano confermare che lo sfruttamento intensivo delle risorse naturali di un territorio, una maggiore urbanizzazione, una forte attrattività turistica, e in generale un maggiore livello di ricchezza economica possono incidere negativamente e pesantemente sui livelli generali di inquinamento da CO₂. Sul fronte opposto, rileviamo che, nonostante sia impossibile individuare una panacea al progressivo degrado ambientale, un contributo rilevante può derivare dall'imboschimento e dalla forestazione, dall'utilizzo di fonti energetiche alternative³⁰ e da una maggiore apertura commerciale e finanziaria verso l'estero, che consenta di importare protocolli e ritrovati tecnologici più efficienti e dunque suscettibili di abbattere le emissioni dei sistemi produttivi industriali.

Fra quest'ultimi possiamo ricordare: i) l'introduzione di fonti energetiche alternative e rinnovabili come il bioetanolo e le biomasse (Lippke *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2015) e ii) lo sviluppo di processi di agricoltura simbiotica, i.e. l'utilizzo di microbiologia positiva (batteri, funghi³¹ e lieviti) che consenta di neutralizzare i c.d. stress abiotici a cui sono sottoposti le piante, come gli sbalzi termici, le elevate temperature, la siccità, l'elevata salinità del terreno e delle acque irrigue, le carenze nutritive e la presenza di metalli pesanti nel terreno (Vernieri *et al.*, 2006; Obata, Fernie, 2012; Zhu, 2016).

Tali innovazioni, pur consentendo una riduzione delle emissioni inquinanti e un miglioramento significativo della produttività³², possono generare impatti anche molto significativi sui sistemi socioeconomici e politici dei paesi arretrati, come la perdita di conoscenza contestualizzata e "millenaria" o l'introduzione di barriere all'ingresso nel mercato della terra. Si dovrà, dunque, tener conto anche di questi fattori, al fine di non creare distorsioni nell'equilibrio già precario dei sistemi produttivi dei paesi più poveri.

Tali risultanze sollevano dunque la necessità, soprattutto per i paesi avanzati e le economie emergenti, di affrontare sistematicamente e seriamente il problema della sostenibilità ambientale della crescita economica.

³⁰ Questo è punto dirimente se si pensa che i primi 25 paesi al mondo per produzione di gas e petrolio nel periodo 2000-2014 (elaborazioni su dati U. S. Energy Information Administration) hanno registrato una media pro-capite di emissioni di CO₂ pari a 11,38 e 12,26 tonnellate, di gran lunga superiore rispetto al resto del mondo, che non ha superato in media le 3,7 e le 3,65 tonnellate di CO₂, rispettivamente (elaborazioni su dati World Bank).

³¹ Si tratta delle così dette micorrize, che – a causa della loro versatilità e straordinarie proprietà – negli ultimi anni hanno registrato una certa popolarità (Smith e Read, 2010; Di Martino *et al.*, 2018).

³² Nel caso degli stress abiotici, essi possono determinare la perdita di circa il 70% della produttività totale delle colture più importanti (Boyer, 1982).

I.e., di favorire lo sviluppo della c.d. bioeconomia, nelle sue tre accezioni: la *bio-technology*, la *bio-resource* e la *bio-ecology*. Nello specifico: i) la *bio-technology* si riferisce all'importanza della ricerca e dell'implementazione della biotecnologia nei diversi settori economici; ii) la *bio-resource* si concentra sulla sperimentazione e lo sviluppo di materie prime biologiche, nonché sulla creazione di nuove catene del valore in una logica di Economia Circolare; e infine iii) la *bio-ecology* sottolinea i processi ecosostenibili che consentono un uso più efficiente dell'energia, promuove la biodiversità ed evidenzia l'importanza di preservare il suolo (Bugge *et al.*, 2016).

Una scelta che potrebbe avere un senso anche solo sotto un profilo di mera profittabilità economica. Difatti, il settore della bioeconomia negli ultimi anni ha dimostrato buone potenzialità di crescita e di espansione. Es., solo nel periodo 2010-2015, il suo fatturato nell'UE-28 è cresciuto circa del 10%. A livello assoluto, nel 2015 essa valeva quasi l'8% (2,28 miliardi di euro) dell'intero pil dell'UE-28, e impiegava 18,5 milioni di lavoratori, ovvero circa l'8,5% dell'intera forza lavoro impiegata nell'UE-28. E i settori maggiormente coinvolti riguardavano gli alimenti e le bevande³³, l'industria primaria (agricoltura e foreste), e i comparti della chimica e dei materiali plastici (Piotrowski *et al.*, 2016, 2018)³⁴.

Un ruolo ovviamente complementare è quello che potrebbero svolgere le fonti energetiche rinnovabili. Es., nell'UE-28 nel 2015 il 16,56% dei consumi complessivi di energia elettrica erano coperti dalle energie rinnovabili³⁵. Tale incidenza è cresciuta notevolmente dal 1990, quando la quota di energia assicurata dalle fonti rinnovabili si assestava solo al 6,12%; un business che nel 2015 ha assorbito circa 1,14 milioni di lavoratori e ha prodotto un fatturato pari a 153 miliardi di euro nella sola UE-28 (EurObserv'ER, 2016; World Bank database)³⁶.

Dati che sottolineano le grandi potenzialità dei set-

³³ Da solo, il comparto alimentare e delle bevande nel 2015 valeva 1,14 miliardi di euro, ovvero il 50% del fatturato complessivo generato dalla bioeconomia nell'UE-28; e assorbiva circa 10 milioni di lavoratori.

³⁴ Ma non solo, alcuni dei settori *bio-based* mostrano una produttività estremamente elevata. È il caso dei settori della produzione di elettricità e di biocombustibili liquidi, che nel 2014 hanno fatto registrare rispettivamente 820.000 e 530.000 euro di fatturato per persona impiegata. Al terzo posto troviamo a pari merito i settori della produzione dei prodotti chimici, farmaceutici, plastici e della gomma, che hanno fatto segnare circa 320.000 euro di fatturato per persona impiegata (Ronzon *et al.*, 2017).

³⁵ Bisogna comunque sottolineare che a livello mondiale l'apporto complessivo delle risorse rinnovabili ai consumi energetici finali ha fatto segnare un trend piuttosto statico, passando dal 17,1% del 1990 al 18% del 2015.

³⁶ Inoltre, diversi studi confermano l'esistenza di forte correlazione positiva fra consumi energetici da fonti rinnovabili e crescita del pil, sia in Europa che nel resto del mondo (Apergis e Payne, 2012; Ntanos *et al.*, 2018).

tori dello sviluppo sostenibile, capaci allo stesso tempo di assorbire quote rilevanti della forza lavoro e di creare indotto per segmenti primari del sistema economico.

7. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha cercato di perseguire due obiettivi fra loro complementari: *i*) in prima istanza, di indagare l'effettiva efficacia e cogenza dei principali accordi internazionali sulle emissioni di gas serra per i paesi sviluppati; e *ii*) in secondo luogo, di individuare, attraverso l'analisi delle determinanti della CO₂, gli strumenti di politica economica e ambientale più opportuni nella lotta al surriscaldamento globale.

In merito al primo obiettivo, i risultati suggeriscono che nel periodo 1990-2014 i paesi con reddito maggiore, non solo hanno contribuito in modo solo marginale e incidentale alla riduzione della CO₂, ma hanno fatto registrare un'elasticità al reddito delle emissioni superiore rispetto a quella dei paesi con reddito inferiore. In altre parole, hanno concorso in modo proporzionalmente maggiore all'inquinamento, in rapporto alla crescita economica sperimentata.

Con riguardo al secondo obiettivo, le stime evidenziano che i fattori direttamente collegati alla crescita economica, come il reddito, il consumo di energia, l'urbanizzazione, l'espansione delle aree coltivate, il turismo e lo sfruttamento delle risorse naturali, presentano un rapporto di correlazione positiva con la dinamica delle emissioni di CO₂. Mentre, l'utilizzo di fonti energetiche alternative, gli interventi di forestazione e imboschimento, e l'apertura ai mercati esteri sono negativamente correlati alle emissioni di CO₂.

Ovviamente, la sostenibilità ambientale ed economica non possono prescindere dalla sostenibilità sociale, che deve essere assicurata nelle sue quattro dimensioni principali: *i*) la sicurezza, intesa come la necessità di adottare tutti gli strumenti possibili per la riduzione dei pericoli nel lungo periodo; *ii*) la giustizia, intesa come diritto trasversale all'identità, all'equità di trattamento e alle pari opportunità; *iii*) l'*eco-prosumption*, i.e. la produzione di valore aggiunto secondo modelli rispettosi dell'ambiente e socialmente responsabili; e *iv*) le *urban forms*, i.e. la dimensione fisica desiderata dei modelli di sviluppo urbano (Eizenberg, Jabareen, 2017). Difatti, secondo Samimi *et al.* (2011) e Arfanuzzaman (2016) l'indice di sviluppo umano (HDI)³⁷ – che è una buona misura di sintesi del grado di sviluppo sociale di un pae-

se – ha un impatto positivo e significativo sulle performance ambientali, sia nei paesi industrializzati che in via di sviluppo.

In definitiva, nonostante i notevoli sforzi in ambito comunitario e globale, ancora molto deve essere fatto affinché i processi di degradazione ambientale e di perdita della biodiversità possano essere rallentati. Gli strumenti fin qui implementati non hanno consentito di ridurre significativamente le immissioni di gas serra nell'atmosfera, condizione necessaria per evitare gli impatti negativi sul benessere dell'umanità nel lungo periodo.

Molto dipenderà, come abbiamo sottolineato nei precedenti passaggi, da come il processo di decarbonizzazione dell'economia potrà sfruttare le potenzialità di sviluppo future della bioeconomia e dalle sue applicazioni nei diversi settori produttivi. Solo rendendo economicamente conveniente l'adozione di innovazioni tecnologiche, specialmente in campo industriale ed energetico, si riuscirà, forse, a pervenire alla responsabilizzazione e alla cooperazione di tutti i soggetti coinvolti.

BIBLIOGRAFIA

- Akin C.S. (2014). The impact of foreign trade, energy consumption and income on CO₂ emissions. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 4(3): 465-475.
- Andersson F.N.G., Karpestam P. (2013). CO₂ emissions and economic activity: Short-and long-run economic determinants of scale, energy intensity and carbon intensity. *Energy Policy*, 61: 1285-1294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.004>
- Ang J.B. (2007). CO₂ emissions, energy consumption, and output in France. *Energy Policy*, 35(10): 4772-4778. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.03.032>
- Ang J.B. (2009). CO₂ emissions, research and technology transfer in China. *Ecological Economics*, 68(10): 2658-2665. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.002>
- Arfanuzzaman M. (2016). Impact of CO₂ emission, per capita income and HDI on Environmental Performance Index: empirical evidence from Bangladesh. *International Journal of Green Economics*, 10(3-4): 213-225. <https://doi.org/10.1504/IJGE.2016.081900>
- Apergis N., Payne J.E. (2012). Renewable and non-renewable energy consumption-growth nexus: Evidence from a panel error correction model. *Energy Economics*, 34(3): 733-738. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.04.007>
- Baccini A., Goetz S.J., Walker W.S., Laporte N.T., Sun M., Sulla-Menashe D., Hackler J., Beck P.S.A., Dubayah

³⁷ Si tratta di un indice compreso fra 0 e 1, costruito sulla base di tre pilastri: *i*) speranza di vita; *ii*) grado di istruzione della popolazione; e *iii*) potere d'acquisto del reddito medio (UNDP, 2016).

- R., Friedl M.A., Samanta S., Houghton R.A. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2(3): 182-185. doi:10.1038/nclimate1354
- Balogh J.M., Jámbor A. (2017). Determinants of CO2 Emission: A Global Evidence. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7(5): 217-226.
- Blenden J., Arndt D.S., Hartfield G., eds. (2018). State of the Climate in 2017. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(8): Si-S332. doi:10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1
- Boyer J.S. (1982). Plant Productivity and Environment. *Science*, 218(4571): 443-448. DOI: 10.1126/science.218.4571.443
- Bugge M.M., Hansens T., Klitkou A. (2016). What is the bioeconomy? A review of the literature. *Sustainability*, 8(7): 1-22. doi:10.3390/su8070691
- Castellucci L. (2017). *Lezioni di politica economica ambientale*. Bologna: Esculapio.
- Choi E., Heshmati A., Cho Y. (2010). An empirical study of the relationships between CO2 emissions, economic growth and openness. IZA DP No. 5304. Testo disponibile al sito: <http://ftp.iza.org/dp5304.pdf> (data di consultazione 12 marzo 2018).
- Csereklyei Z., Rubio-Varas M.D.M., Stern D.I. (2016). Energy and Economic Growth: The Stylized Facts. *Energy Journal*, 37(2): 223-255. DOI: 10.5547/01956574.37.2.zcse
- Dean J.M., Mary E.L., Hua Wang (2009). Are foreign investors attracted to weak environmental regulations? Evaluating the evidence from China. *Journal of development economics*, 90(1): 1-13. <http://dx.doi.org/10.1596/1813-9450-3505>
- Di Martino C., Palumbo G., Vitullo D., Di Santo P., Fuggi A. (2018). Regulation of mycorrhiza development in durum wheat by P fertilization: Effect on plant nitrogen metabolism. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(3): 429-440.
- Dogan E., Seker F. (2016a). An investigation on the determinants of carbon emissions for OECD countries: empirical evidence from panel models robust to heterogeneity and cross-sectional dependence. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(14): 14646-14655. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-6632-2>
- Dogan E., Seker F. (2016b). Determinants of CO2 emissions in the European Union: The role of renewable and non-renewable energy. *Renewable Energy*, 94: 429-439. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.078>
- Eizenberg E., Jabareen Y. (2017). Social sustainability: A new conceptual framework. *Sustainability*, 9(1): 68. doi:10.3390/su9010068
- EurObserv'ER (2016). The State of Renewable Energies in Europe. Edition 2016. Testo disponibile al sito: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2016/EurObservER-Annual-Overview-2016-EN.pdf> (data di consultazione 1 giugno 2018).
- Friedl B., Getzner M. (2003). Determinants of CO2 emissions in a small open economy. *Ecological economics*, 45(1): 133-148. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00008-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00008-9)
- Ghosh B.C., Alam K.J., Osmani M.A.G. (2014). Economic growth, CO2 emissions and energy consumption: The case of Bangladesh. *International Journal of Business and Economics Research*, 3(6): 220-227. doi:10.11648/j.ijber.20140306.13
- Gosseries A. (2004). Historical emissions and free-riding. *Ethical perspectives*, 11(1): 36-60. <http://dx.doi.org/10.2143/EP.11.1.504779>
- Grace J., Mitchard E., Gloor E. (2014). Perturbations in the carbon budget of the tropics. *Global Change Biology*, 20(10): 3238-3255. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12600>
- Grossman G.M., Krueger A.B. (1991). Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement. *National Bureau of Economic Research, Working Paper No. 3914*. Testo disponibile al sito: <http://www.nber.org/papers/w3914.pdf> (data di consultazione 15 aprile 2018).
- Hardin G. (1968). The Tragedy of the Commons. *Science*, 162(3859): 1243-1248.
- Huber P.J. (1967). The Behavior of Maximum Likelihood Estimates under Nonstandard Conditions. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1(1): 221-233.
- Huggel C., Wallimann-Helmer I., Stone D., Cramer W. (2016). Reconciling justice and attribution research to advance climate policy. *Nature Climate Change*, 6(10): 901-908. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3104>
- IPCC (2014). Climate change 2014: Mitigation of climate change. In: Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Savolainen J., Schlömer S., von Stechow C., Zwickel T., Minx J.C., eds., *Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press. Testo disponibile al sito: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/> (data di consultazione 2 marzo 2018).
- Iwata H., Okada K., Samreth S. (2012). Empirical study on the determinants of CO2 emissions: evidence

- from OECD countries. *Applied Economics*, 44(27): 3513-3519. <http://dx.doi.org/10.1080/00036846.2011.577023>
- Kuznets S. (1955). Economic growth and income inequality. *American economic review*, 45(1): 1-28.
- Lee J.W., Brahmasrene T. (2013). Investigating the influence of tourism on economic growth and carbon emissions: Evidence from panel analysis of the European Union. *Tourism Management*, 38: 69-76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tourman.2013.02.016>
- Lim K.M., Lim S.Y., Yoo S.H. (2014). Oil consumption, CO₂ emission, and economic growth: Evidence from the Philippines. *Sustainability*, 6(2): 967-979. <http://dx.doi.org/10.3390/su6020967>
- Lippke B., Puettmann M.E., Johnson L., Gustafson R., Venditti R., Steele P., Katers J.F., Taylor A., Volk T.A., Oneil E., Skog K., Budsberg E., Daystar J., Caputo J. (2012). Carbon emission reduction impacts from alternative biofuels. *Forest Products Journal*, 62(4): 296-304. <https://doi.org/10.13073/12-00021.1>
- Meyer L.H., Roser D. (2010). Climate justice and historical emissions. *Critical review of international social and political philosophy*, 13(1): 229-253. <http://dx.doi.org/10.1080/13698230903326349>
- Mohajan H. (2011). Dangerous effects of methane gas in atmosphere. *International Journal of Economic and Political Integration*, 1(2): 3-10.
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A., Jones P.D. (2012). Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. *Journal of Geophysical Research*, 117(D08101). DOI: 10.1029/2011JD017187
- Ntanos S., Skordoulis M., Kyriakopoulos G., Arabatzis G., Chalikias M., Galatsidas S., Batzios A., Katsarou A. (2018). Renewable Energy and Economic Growth: Evidence from European Countries. *Sustainability*, 10(8): 1-13. DOI: 10.3390/su10082626
- Obata T., Fernie A.R. (2012). The use of metabolomics to dissect plant responses to abiotic stresses. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 69(19): 3225-3243. <http://doi.org/10.1186/1471-2229-11-163>
- Pazienza P. (2015). The relationship between CO₂ and Foreign Direct Investment in the agriculture and fishing sector of OECD countries: Evidence and policy considerations. *Intellectual Economics*, 9(1): 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.intele.2015.08.001>
- Piccarini P. (2018). *Società sostenibili e processi trasformativi*. Milano: Franco Angeli.
- Piotrowski S., Carus M., Carrez D. (2016). European Bioeconomy in Figures. Hürth: nova-Institute for Ecology and Innovation. Testo consultabile al sito: <https://biconsortium.eu/sites/biconsortium.eu/files/news-image/16-03-02-Bioeconomy-in-figures.pdf> (data di consultazione 15 maggio 2018).
- Piotrowski S., Carus M., Carrez D. (2018). European Bioeconomy in Figures 2008-2015. Hürth: nova-Institute for Ecology and Innovation. Testo consultabile al sito: https://biconsortium.eu/sites/biconsortium.eu/files/documents/European_Bioeconomy_in_Figures_2008-2015_06042018.pdf (data di consultazione 15 maggio 2018).
- Ravallion M., Heil M., Jalan J. (2000). Carbon emissions and income inequality. *Oxford University Papers*, 52(4): 651-669. Testo disponibile al sito: https://www.jstor.org/stable/3488662?seq=1#page_scan_tab_contents
- Rodrik D. (2011). *The globalization paradox: why global markets, states, and democracy can't coexist*. Oxford: Oxford University Press (trad. It.: La globalizzazione intelligente. Roma: Laterza, 2011).
- Ronzon T., Lusser M., Klinkenberg M. (eds), Landa L., Sanchez Lopez J. (eds), M'Barek R., Hadjamu G. (eds), Belward A. (eds), Camia A. (eds), Giuntoli J., Cristobal J., Parisi C., Ferrari E., Marelli L., Torres de Matos C., Gomez Barbero M., Rodriguez Cerezo E. (2017). Bioeconomy Report 2016. Brussels: JRC Scientific and Policy Report. EUR 28468 EN. Testo disponibile al sito: https://biobs.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/files/JRC_Bioeconomy_Report2016.pdf (data di consultazione 28 maggio 2018).
- Samimi A.J., Kashefi A., Salatin P., Lashkarizadeh M. (2011). Environmental Performance and HDI: Evidence from Countries Around the World. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 10(3): 294-301.
- Schmalensee R., Stoker T.M., Judson R.A. (1998). World carbon dioxide emissions: 1950-2050. *Review of Economics and Statistics*, 80(1): 15-27. <http://dx.doi.org/10.1162/003465398557294>
- Shafik N. (1994). Economic Development and Environmental Quality: An Economic Analysis. *Oxford Economic Papers*, 46(Supplement_1): 757-773. http://dx.doi.org/10.1093/oep/46.Supplement_1.757
- Shakouri B., Yazdi S.K., Ghorchebigi E. (2017). Does tourism development promote CO₂ emissions? *Anatolia*, 28(3): 444-452. <https://doi.org/10.1080/13032917.2017.1335648>
- Shapiro S.S., Wilk M.B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4): 591-611.
- Sharma S. (2011). Determinants of carbon dioxide emissions: Empirical evidence from 69 countries. *Applied Energy*, 88(1): 376-382. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.022>

- Smith S.E., Read D.J. (2010). *Mycorrhizal Symbiosis. Third Edition*. Oxford: Academic Press.
- Solarin S.A. (2014). Tourist arrivals and macroeconomic determinants of CO2 emissions in Malaysia. *Anatolia*, 25(2): 228-241. <http://dx.doi.org/10.1080/13032917.2013.868364>
- Tirole J. (2017). *Economics for the Common Good*. Princeton: Princeton University press.
- Tiwari, A.K. (2011), Energy consumption, CO2 emissions and economic growth: A revisit of the evidence India. *Applied Econometrics and International Development*, 11(2): 99-117.
- UNDP (2016). Human Development Report 2016. Testo disponibile al sito: http://hdr.undp.org/sites/default/files/2016_human_development_report.pdf (data di consultazione 7 agosto 2018).
- United Nations (1998). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Testo disponibile al sito: <https://unfccc.int/sites/default/files/kpeng.pdf> (data di consultazione 5 aprile 2018).
- United Nations (2012). Doha amendment to the Kyoto Protocol. Testo disponibile al sito: https://unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/kp_doha_amendment_english.pdf (data di consultazione 5 aprile 2018).
- United Nations (2015). Paris Agreement. Testo disponibile al sito: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (data di consultazione 6 aprile 2018).
- United Nations (2018). Department of Economics and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. Testo disponibile al sito: <https://esa.un.org/unpd/wup/Download/> (data di consultazione 5 agosto 2018).
- Vernieri P., Ferrante A., Mugnai S., Pardossi A. (2006). Stress abiotici e bilancio ormonale nelle piante coltivate. *Italus Hortus*, 13(1): 19-31.
- Wackernagel M., Rees W. (1998). *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth*. Gabriola Island: New Society Publishers.
- Wang Q., Zeng Y.E., Wu B.W. (2016). Exploring the relationship between urbanization, energy consumption, and CO2 emissions in different provinces of China. *Renewable and sustainable energy reviews*, 54: 1563-1579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.090>
- Weber C.L., Peters G.P., Guan D., Hubacek K. (2008). The contribution of Chinese exports to climate change. *Energy Policy*, 36(9): 3572-3577. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.009>
- White H. (1980). A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 48(4): 817-838.
- Yunus M. (2008). *Vers un nouveau capitalism*. Paris: JC Lattès (trad. It.: Si può fare! Come il business sociale può creare un capitalismo più umano. Milano: Feltrinelli, 2010).
- Zhang F., Johnson D.M., Wang J. (2015). Life-cycle energy and GHG emissions of forest biomass harvest and transport for biofuel production in Michigan. *Energies*, 8(4): 3258-3271. DOI:10.3390/en8043258
- Zhu J.K. (2016). Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell*, 167(2): 313-324. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>

APPENDICE

Tabella A.1. Alcune statistiche descrittive sulle variabili del modello OLS.

Variabili	N	Media	Mediana	Deviazione standard	Coeff. di variazione
Emissioni	175	128,75	117,13	66,65	0,52
Pil pro-capite	175	149,38	133,72	51,74	0,25
Consumo energia	175	122,08	109,39	70,51	0,58
Urbanizzazione	175	111,10	106,43	15,34	0,14
Superficie fores.	175	100,33	100,00	15,56	0,16
Superficie agricola	175	100,30	100,00	14,02	0,14
Nucleare e altre f.	175	249,27	100,00	1047,4	4,20
Apertura comm.	175	135,75	112,97	268,53	1,98
Esaurimento ris.	175	330,88	115,27	938,11	2,84
Turisti internaz.	175	326,47	201,22	389,56	1,19
IDE in entrata	175	5,52	3,56	9,69	1,76

Fonte: elaborazioni dell'autore su dati World Bank.

Tab. A.2. Coefficienti di correlazione fra le variabili del modello OLS, calcolati usando le osservazioni 1-175; valore critico al 5% (per due code) = 0,1484.

Pil pro-capite	Consumo energia	Urbaniz.	Superficie Agricola	Superficie forestale	Nucleare e altre fonti	
1,0000	0,1927	0,2368	0,0709	0,0275	0,0827	Pil pro-cap.
	1,0000	0,1578	0,0204	0,0694	-0,1095	Energia
		1,0000	0,0658	-0,2324	-0,0719	Urbaniz.
			1,0000	-0,0904	-0,0576	S. Agricola
				1,0000	-0,0488	S. Forestale
					1,0000	Nucleare
Apertura Commerc.	Esaurim. risorse	Turisti internaz.	IDE in entrata	Emissioni di CO ₂		
0,3086	0,0532	0,3456	0,0179	0,3351		Pil pro-cap.
-0,0032	-0,0061	0,0602	-0,0578	0,8611		Energia
0,0702	-0,0574	0,1274	-0,0871	0,2576		Urbaniz.
0,0924	0,0148	0,0930	-0,0034	0,1628		S. Agricola
-0,0723	0,1572	-0,0250	0,0432	-0,1008		S. Forestale
0,0715	0,1559	-0,0152	-0,1465	-0,1685		Nucleare
1,0000	-0,0004	0,0612	-0,0147	0,0190		A. commerc.
	1,0000	0,0169	0,0194	0,0270		E. Risorse
		1,0000	-0,0503	0,1902		Turisti Int.
			1,0000	-0,0476		IDE in ent.
				1,0000		Emissioni

Fonte: elaborazioni dell'autore su dati World Bank.